

文章编号 1004-924X(2023)16-2395-11

## 悬丝摆式加速度计底座组件自动装配与焊接控制

任同群, 桑永胜, 曹润赅, 吴 晗, 王晓东\*

(大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116085)

**摘要:**悬丝摆式加速度计具有小型化、大量程和抗冲击的特点,在航空航天领域得到广泛的应用。其底座与摆组件的精密装配,目前仍以人工装配为主,具有装配精度差、悬丝张紧力不易控制,人工焊接时焊接参数难以保证、焊点质量不佳等问题,导致产品的良品率较低。为此,研发了一套悬丝摆式加速度计底座组件自动装配与焊接设备。根据零件特点与装配环境,采用视觉与力觉反馈控制,实现底座与摆组件位姿和悬丝张紧力的自动调整。基于C++语言,开发了分层架构的控制软件。设计温度反馈控制的焊接工艺流程与焊接策略,并通过有限元仿真与焊接实验进行验证。实验结果表明:该设备可实现自动装配与焊接功能,底座组件的装配精度与焊接质量符合技术指标要求,提高了产品质量。

**关键词:**加速度计底座组件;视觉与力觉反馈;分层架构软件;温度反馈;自动装配与焊接

**中图分类号:**TP241 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233116.2395

## Automatic assembly and welding control of base components of suspended pendulum accelerometer

REN Tongqun, SANG Yongsheng, CAO Rungu, WU Han, WANG Xiaodong\*

(State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

\* Corresponding author, E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

**Abstract:** Suspended pendulum accelerometers are widely used in the aerospace field because of the advantages of miniaturization, a large measuring range, and impact resistance. The precision assembly of the base and pendulum components is still mainly manual, with poor assembly accuracy, unstable suspension tension, unguaranteed welding parameters, and poor solder joint quality. These result in a low product yield. To address this, a set of automatic assembly and welding equipment for the pendulum accelerometer base components was developed in this study. According to the characteristics of the parts and the assembly environment, using visual and force feedback control realizes the automatic adjustment of the posture and suspension tension of the base and swing components. Control software for the layered architecture was developed based on the C++ language. A welding process and welding strategy controlled by temperature feedback were designed, and they were verified by finite element simulation and a welding experiment. The experimental results show that the equipment can realize automatic assembly and welding functions, and the assembly accuracy of the base assembly meets the requirements of the technical indicators, which improves the product quality.

收稿日期:2023-02-16;修订日期:2023-04-04.

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(No. XLYC2002020);国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB1310901)

**Key words:** accelerometer base assembly; visual and force feedback; hierarchical architecture software; temperature feedback; automatic welding

## 1 引言

悬丝摆式加速度计的制造精度主要取决于零部件的加工精度以及其底座组件的装配与焊接精度<sup>[1]</sup>。底座组件由带微米级悬丝的摆组件和毫米级的底座组成,尺寸跨度大,装配关系复杂。其装配任务难点主要包括:摆组件悬丝的送丝穿孔及其在装配与焊接过程中的实时张紧控制;悬丝与底座焊接面的高质量自动化焊接。长期以来,其装配焊接主要依靠人工操作,由于底座组件尺寸微小、一致性差,且焊锡量、焊接温度及焊接时间等焊接工艺参数难以把控,导致对工人的技术水平要求较高<sup>[2]</sup>,装配精度及焊接质量无法得到保证。因此,亟需研制底座组件的自动装配与焊接设备替代手工作业,提高装配精度与焊接质量的可靠性。

对于微细悬丝的穿孔与张紧,需要实时获取悬丝及底座微孔的位置关系。Giouroudi I<sup>[3]</sup>等人开发了光纤半自动装配系统,该系统基于机器视觉,可实时将夹钳的位置与光纤位置进行比较,完成了直径 50~150  $\mu\text{m}$  光纤的精密装配,但该系统只完成了光纤的拾取操作,并未涉及精准穿孔与张紧力控制。南京理工大学<sup>[4]</sup>研制了一种以 9  $\mu\text{m}$  直径桥丝为对象的自动送丝系统,利用电机驱动放线筒以及焊盘,利用导向轮稳定送丝方向,并且采用增量式 PID 算法控制张紧力,张紧力误差可控制在 8% 以内。该控制系统各环节精度要求较高,导致送丝系统控制较为复杂。

对于复杂形状微小零件的自动化焊接,需设计专用自动化焊接系统。何泽钧<sup>[5]</sup>等人针对扁平形元件的形状特点,设计了一套集成机械臂、视觉、传感和加热电烙铁于一体的自动锡焊机构,可对焊接区域进行精确定位;北京机械工业自动化研究所<sup>[6]</sup>提出了一种焊锡机器人,可针对电路板金属腔体工件内地微小元件完成焊接作业。但机械臂和焊锡机器人活动空间较大,不适用于紧凑型的工作空间,且以上研究对于焊接工艺参数的分析较少,焊接质量稳定性不佳。焊接工艺

参数主要包括热源、焊料量、焊接温度和焊接时间,如果没有成熟的焊接工艺,即便采用先进的自动焊接技术也无法获得理想的焊接质量<sup>[7]</sup>。A V Murygin<sup>[8]</sup>等开发了基于 C++ 的软件控制系统,定义了温度传感器的加热规律,确保焊接头达到所需焊接温度,稳定地实现了感应焊接过程;任豪<sup>[9]</sup>等提出了一种基于标准焊缝数学模型的自动确定焊料量的方法,通过机器视觉获取目标焊缝的焊接数据,并存入焊接数据库中,以后每次焊接都利用数据库中相匹配的参数进行自动焊接,有效代替了人工调试参数的方法。但以上研究在应用过程中仍需大量的手动测量,且未涉及到焊接前零件精密装配的问题。

综上,针对待装配与焊接零件的特点和任务要求,开发了一套悬丝摆式加速度计底座组件自动装配与焊接设备。开发自动化控制软件,制定可靠的焊接策略,实现底座组件自动装配与稳定焊接控制。

## 2 装配任务及设备结构

### 2.1 装配任务

图 1(a)是摆组件的组成示意图,采用的是力平衡式结构<sup>[10]</sup>,主要由涡流片、悬丝、玻璃管、弯耳以及摆框架组成<sup>[11]</sup>;图 1(b)是加速度计底座示意图,左右两个立柱表面为待焊接面,其中调节轴一侧(左侧)具有微细通孔,在装配时应将摆组件悬丝穿过此通孔;两零件装配后,其装配效果如图 1(c)和图 1(d)所示,精密装配系统需同时满足以下几项主要技术指标:

(1)磁钢边缘与摆框架内边缘之间的间距满足 $(D1 \pm 0.1)\text{mm}$ 。

(2)加速度计底座底面与摆组件悬丝中心线之间的距离满足 $(D2 \pm 0.05)\text{mm}$ 。

(3)焊接过程中悬丝张紧力要求在 $(F \pm 20)\text{mN}$ ( $10\text{mN} \approx 1\text{gF}$ )。

(4)焊点光滑、圆润、无虚焊,焊点分布位置准确。

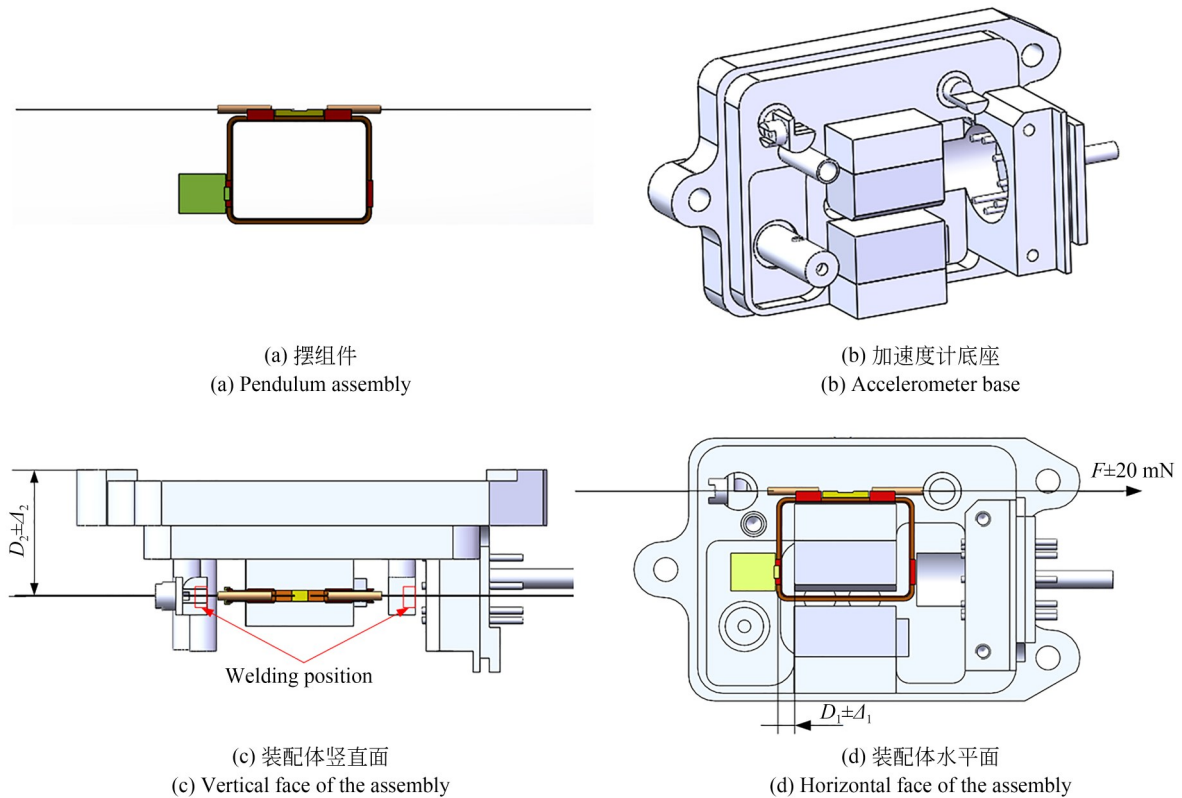


图 1 装配零件结构图

Fig. 1 Structure of assemble part

## 2.2 设备整体结构

根据功能需求的不同,将装配过程拆解为:摆组件拾取、悬丝穿孔并将摆组件套装到底座上、夹紧并预紧悬丝、调整摆组件与底座间隙、焊接悬丝等。其中,摆组件属于挠性组件,摆框架容易发生变形,悬丝材料抗拉强度较低,因此,采用气动式微小夹持器拾取摆组件;为保证装配精度,需获取底座组件水平和垂直两个方向的图像信息,但由于工作空间紧凑,且加速度计底座结构复杂,在装配过程中摆组件容易与立柱发生碰撞,故采用三轴精密转台,可使相机在固定的情况下,通过底座翻转采集到零件多个方向的图像信息,使设备更具灵活性<sup>[12]</sup>。综合分析,装配任务共需要 14 个自由度。因此,对加速度计底座组件装配与焊接系统进行了模块化设计,包含:工作台模块、操作吸附模块、视觉测量模块、悬丝张紧模块和焊接模块。设备总体结构如图 2 所示。

为防止损伤摆组件,采用吸附式夹持器拾取<sup>[13]</sup>。设计了组合式吸附夹钳,集成在三轴精密滑台的悬臂梁上,如图 3 所示。吸附夹钳分为上

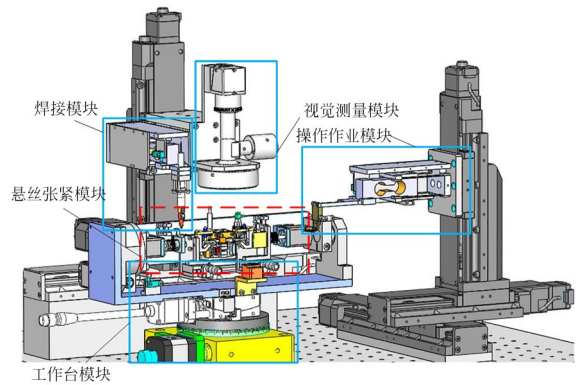


图 2 装配与焊接系统总体结构

Fig. 2 Structure of the assembly and welding system

基体和下基体。工作时,真空负压从上基体通气孔传入,下基体采用三点吸附,吸附孔对准摆组件的三个弯耳(图中箭头位置),将吸附力作用于摆组件。

摆组件与加速度计底座的穿丝与装配过程如图 4 所示。为提高穿孔成功率,在穿丝前将加速度计底座绕 Y 方向顺时针倾斜一定角度,此时 Z 方向的穿孔范围  $d_2$  大于转台旋转前的  $d_1$ ,可确

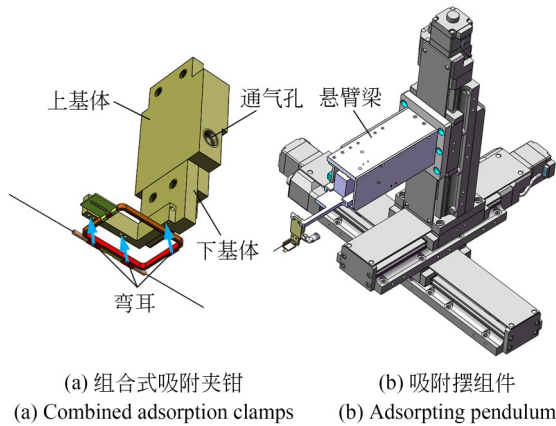


图3 摆组件吸附夹钳结构图

Fig. 3 Structural diagram of adsorption clamp of pendulum

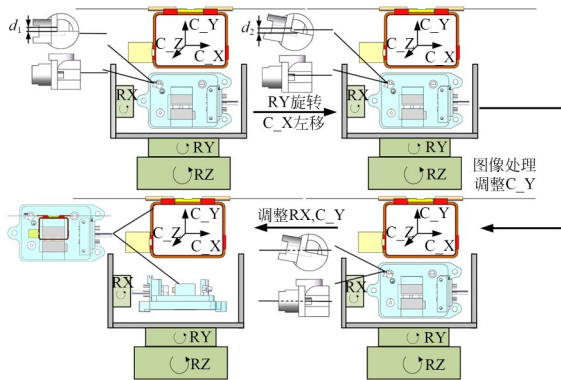


图4 悬丝穿孔与摆组件装配过程

Fig. 4 Suspension wire perforation and pendulum assembly process

保悬丝穿孔时在 $Z$ 方向不会发生碰撞。然后通过视觉引导,即在图像上拟合出悬丝与通孔的中心线,计算出两者间的距离,调整操作模块导轨 $C\_Y$ 使悬丝在 $Y$ 方向上对准通孔中心,之后 $C\_X$ 移动完成悬丝穿孔。最后,通过调整 $RX$ 与 $C\_Y$ 滑台,使底座在与摆组件无碰撞的情况下翻转 $90^\circ$ ,从而将摆框架套装到加速度计底座的磁钢上。

在调整摆组件与底座的装配间隙之前,首先需要对悬丝进行预紧。采用气动式悬丝夹钳,对悬丝末端进行自动夹紧,悬丝夹钳末端与微型拉力传感器连接,并集成在步进直线电机末端。悬丝夹紧后直线电机开始移动使悬丝张紧,力传感器可实时采集到张紧力的大小。其中,拉力传感器性能参数如表1所示。

表1 微型拉力传感器性能参数表

Tab. 1 Performance parameters of miniature tensile pressure sensor

性能指标	参数
量程	2.5 N
输出分辨率	0.001 N
输出灵敏度	$2.0 \pm 10\%$ mV/V
非线性	0.05% F. S.
重复性	0.05% F. S.
安全负载	500%

底座两侧焊接立柱一致性较差,使得焊接面的位置高度有一定随机性。因此,焊接模块采用“先看后动”的视觉引导控制和基于PID自整定的温度反馈控制,该模块的结构组成如图5所示。采用发热芯作为加热的热源,将发热芯安装在加热棒内部,加热棒负责将热量传递给烙铁头,发热芯与加热棒中间有 $0.2\text{ mm}$ 的间隙,为便于热量传递,在发热芯上涂满导热硅脂,使其充满间隙。采用力传感器和限位开关对结构进行硬保护。由于该模块需长期在温度 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的条件下工作,为防止结构受热变形,采用PI高温耐热型材料(聚酰亚胺)制成的隔热轴套进行隔热。电烙铁焊接头采用导热系数好的紫铜材料,缩短焊接时间;烙铁头表面镀铬处理,以防止氧化;烙

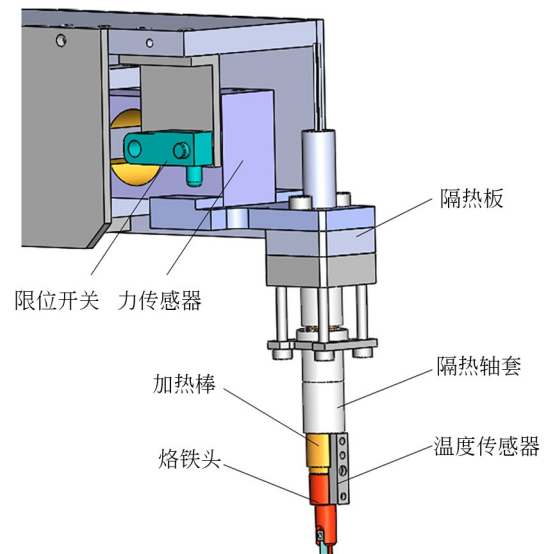


图5 焊接模块组成结构

Fig. 5 Welding module composition structure

铁头前端设计成凹槽形状,使焊锡受热充分、均匀。

### 3 控制系统与软件架构

#### 3.1 控制系统

加速度计底座组件装配与焊接系统任务复杂,涉及控制对象较多,因此,该设备采用了具有较高可靠性和安全性的分布式控制系统。分散各个模块控制功能,将显示操作集中至工控机上,实现了对直线运动滑台、精密转台与直线电机的运动控制,以及工业相机、力传感器、温度控制器、光源照明系统和电磁阀的自动控制。

采用 DS112 控制器控制操作模块与视觉模块的 6 个精密滑台以及绕 X 和 Y 方向的 2 个精密

转台。采用 MPC08E 运动控制卡及 3 个步进电机驱动器,控制 Z 轴精密转台和悬丝张紧模块的 2 个两相步进直线电机。直线电机与微型拉力传感器连接,通过数显表将采集到的力信号传输给工控机,组成了力反馈控制回路,可确保悬丝张紧力稳定在预设范围内。传感器采集的力信号为模拟量,而电磁阀需要输出数字量进行控制,因此采用具有数字量和模拟量 I/O 口的数据采集卡,可实现对这些信号的采集与控制。安装在烙铁头位置的铂电阻温度传感器将采集到的温度传递给温控器,温控器通过 PID 自整定模式调节变压器的通断,从而控制发热芯的加热,形成了温度反馈控制回路,可使温度偏差稳定在  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。总体控制系统原理图如图 6 所示。

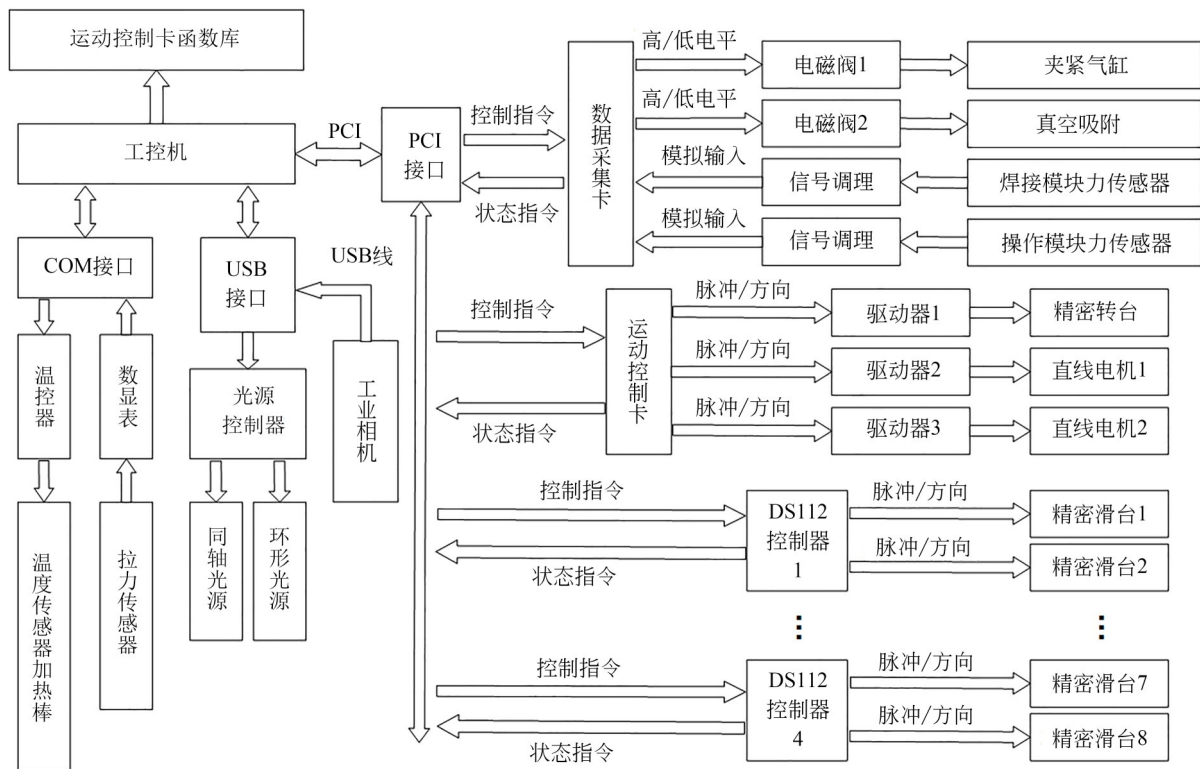


图 6 控制系统硬件连接关系图

Fig. 6 Diagram of control system hardware connection

#### 3.2 软件架构

自动装配与焊接系统控制软件框架基于 C++ 项目搭建,利用 STL 标准数据库类型以及 OpenCV 机器视觉函数库编写而成。其具体功能采用分层架构软件和模块化思想实现,如图 7

所示。

任务层主要解析操作人员的操作指令,结合策略层反馈的装配参数信息,装配系统自动配置预先标定的滑台位置和速度、光源亮度值以及串口参数等,构造动作序列后传递给策略层。

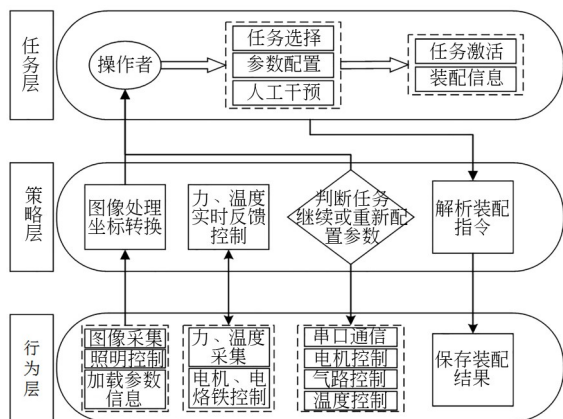


图7 装配系统控制软件分层架构

Fig.7 Assembly system control software layered architecture

策略层接收任务层发出的装配任务指令,并将要具体执行的任务传递给行为层。根据目前装配任务状态或图像处理结果,判断软件执行流向任务层或行为层。

行为层主要接收策略层传来的信息,执行具体自动化操作,包括对视觉图像、力和温度的采集,对精密运动滑台、直线电机、光源、烙铁头温度以及气动回路的控制。行为层还负责将图像、温度、力等装配过程数据进行保存,以记录实验过程数据。

软件控制界面如图8所示,左侧部分为相机显示区域;右侧部分为功能控制区,包括初始化、装配作业、操作提示以及误差显示等区域。

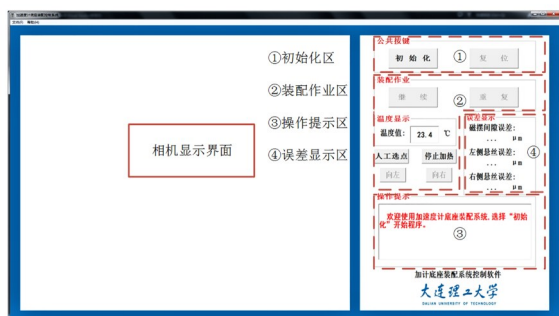


图8 装配系统控制软件

Fig.8 Assembly system control software

在高温焊接过程中,由于加速度计底座组件材料的热胀性,悬丝张紧力会发生突变,而拉力数显表对于力信号的采集显示存在一定的滞后

性。因此,采用“分阶段分速率”的张紧力控制策略,即直线电机以20 pulse/s的速率张紧悬丝,当张紧力靠近预设值时,改为以2 pulse/s的速率继续张紧。将该算法写入自动装配软件创建的悬丝张紧力控制线程中,可实现对悬丝张紧力的实时控制,张紧力控制曲线如图9所示。由图中可知,所采用的控制策略可使焊接过程中悬丝张紧力稳定在要求的 $26 \pm 0.2$  gF范围内,误差为2%以内,与文献[4]相比,本设备采用的方法张紧力控制精度更高。

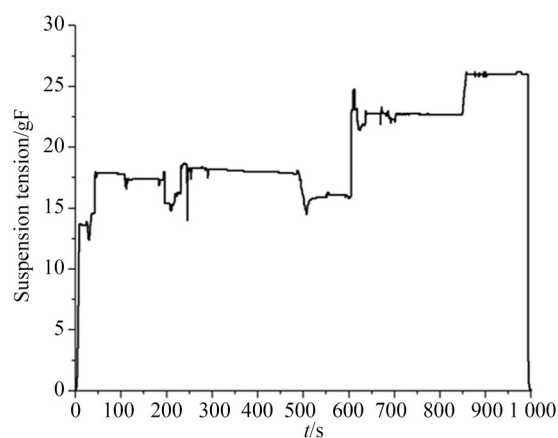


图9 悬丝张紧力控制曲线

Fig.9 Control curve of suspension tension

## 4 焊接策略

加速度计底座与摆组件悬丝采用软钎焊,使用的焊料为锡铅合金,其成分为60%铅与40%锡。整体自动化焊接过程为:通过辅助装置将焊锡片与松香助焊剂放置在安装有惯性摆组件的加速度计底座焊接面的待焊接区域,然后电烙铁自动下压接触焊锡片,使焊锡片熔融,从而将摆组件的悬丝焊接在底座的焊接面上。

### 4.1 焊接工艺参数

焊接工艺参数对焊接质量起到决定性作用。焊接任务所采用的焊料为制式圆柱形焊锡片,尺寸为0.5 mm,厚度为0.3 mm。在焊接前,加速度计底座的两侧焊接面上需要人工在焊点要求的位置搪锡,如图10所示。搪锡可提高焊锡与底座的亲和力,且焊锡在熔化后会优先分布于搪锡的位置,因此,经过搪锡处理后的被焊件焊点位置准确,不易出现虚焊现象。

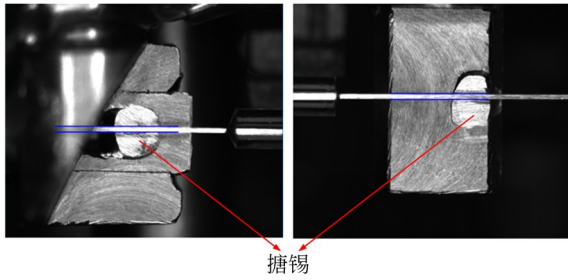


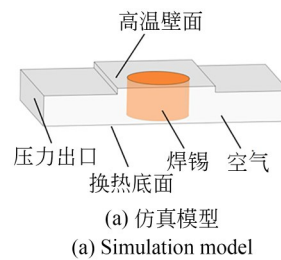
图 10 待焊接面搪锡

Fig. 10 Surface to be welded is tinned

焊接温度直接影响悬丝与底座焊接面的结合强度。若焊接温度过低,会造成焊锡不能充分熔化,使悬丝与焊接面不能充分浸润结合,会造成虚焊、裂纹现象;若温度过高,松香助焊剂挥发过快,碳化后污染焊点<sup>[14-15]</sup>,且会造成元件过热,有损焊接头的使用寿命。焊接时间同时决定了焊接效率与焊接质量,时间过长,则焊接效率降低,且焊锡上的松香助焊剂会完全挥发导致碳化,其残渣会造成焊点出现缺陷,导致焊点变脆且不牢靠<sup>[16]</sup>,一般控制焊接时间不超过 3 s;若焊接时间过短,则焊料不能充分浸润待焊件,易形成虚焊。

焊接任务所采用的锡铅合金焊料,其固相线熔点为 183 °C,液相线熔点为 228 °C,为进一步确定合适的焊接温度与焊接时间,采用 Fluent 有限元仿真的方法。首先采用专业的材料模拟软件 JMatPro 计算出该成分焊锡的热物理性能,如表 2 所示。然后建立如图 11(a)所示的 Fluent 仿真模型,其中高温壁面为焊接头底部的形状轮廓,焊锡片位于焊接头底部的凹槽中间,采用上述材

料的 SnPb 和空气的多相流与熔化凝固模型,进行了多组不同边界条件的瞬态仿真计算。仿真结果如图 11(b)~11(e)所示,其中三维部分显示的是 SnPb 的体积分数为 100% 的等值面,从图中可看出,在焊接温度达到 305 °C、焊接时间为 2 s 时,SnPb 体积分数为 100% 的部分基本消失,表示在此边界条件下的 SnPb 基本全部熔化,即此时在焊接过程中不会产生虚焊现象。结合实际操作经验与焊接实验验证,最终确定焊接温度为 310 °C,焊接时间为 2 s。



(a) 仿真模型  
(a) Simulation model

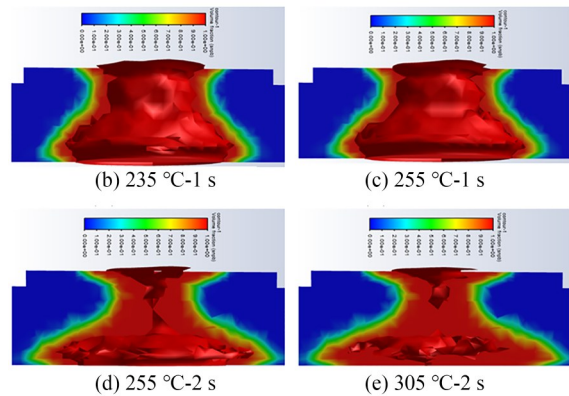


图 11 Fluent 相变仿真结果对比

Fig. 11 Fluent comparison of phase change simulation results

表 2 Sn40Pb60 材料热物性参数表

Tab. 2 Thermophysical parameters of Sn40Pb60 materials

T/°C	50	100	183	200	250	300	350
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	9.19	9.16	8.96	8.93	8.83	8.79	8.74
热导率/W/(m·K)	42.99	41.77	28.28	26.97	22.90	23.74	24.59
比热/J/(g·K)	0.17	0.39	0.59	0.66	0.18	0.19	0.18
动力黏度/(MPa·s)	>100	>100	2.64	2.53	2.20	1.91	1.70

#### 4.2 焊接实验

在人工焊接时,操作人员将电烙铁与焊锡丝接触,待焊锡丝充分熔化后,将沾有熔融焊锡的

电烙铁移动至加速度计底座焊接面上点焊 2~3 s,焊接过程中可根据焊锡熔化情况人为调整电烙铁下压距离以及点焊位置。对于本文采用的自

自动化焊接,由于加速度计底座存在一致性差异,其焊接面高度均不同,导致烙铁头无法一次性准确到达合适的焊接位置高度。因此,为保证焊接位置准确且焊点质量圆润、光滑,采用“分阶段分位置分速度”的焊接策略,如图 12 所示。

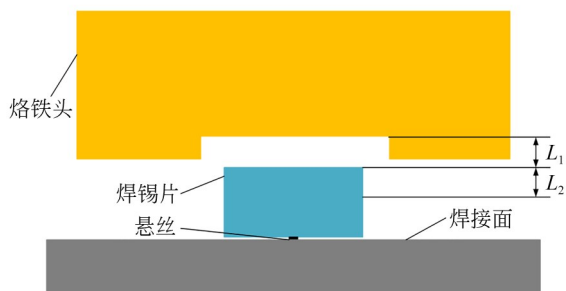


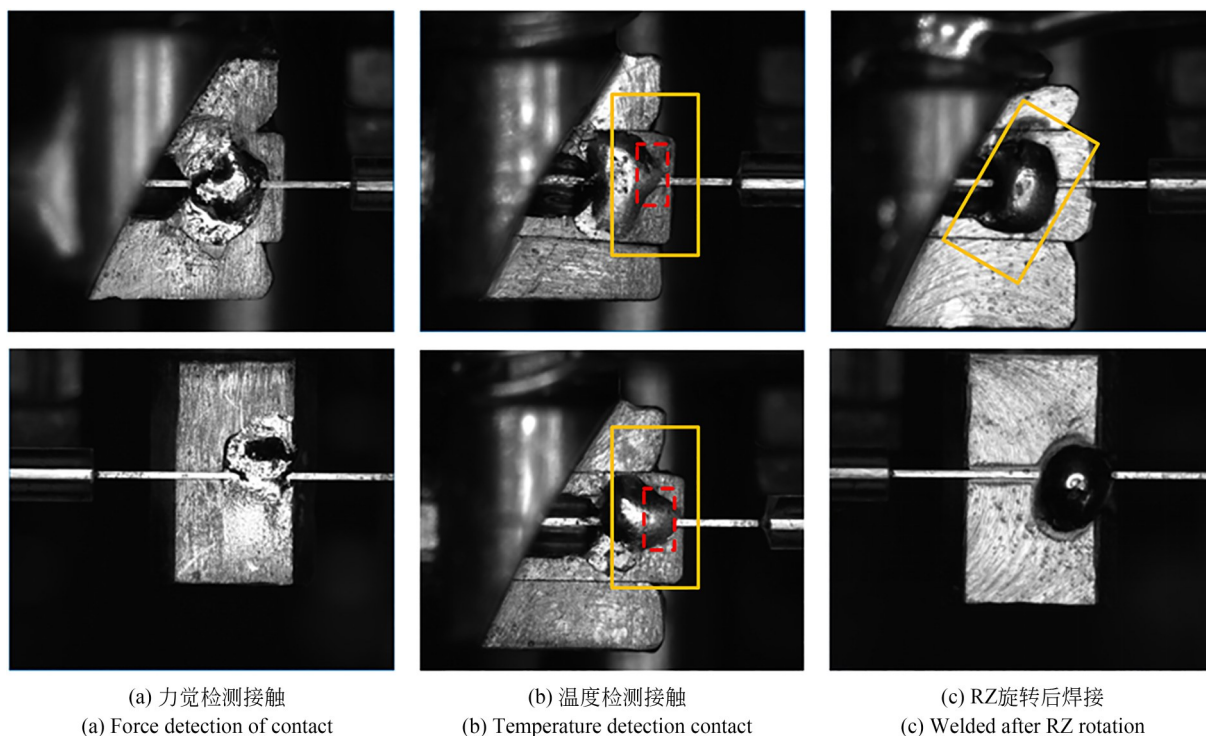
图 12 “分阶段分位置分速度”焊接策略

Fig. 12 Phased, positional, speed welding strategy

在进行焊接动作之前,烙铁头首先移动至距离焊锡片  $L_1$  的位置,待温度加热至  $310\text{ }^\circ\text{C}$  后,以  $20$  脉冲(即  $20\text{ }\mu\text{m}$ )/s 的速度步进下压,当检测到烙铁头与焊锡片接触时,烙铁头由步进运动转变为连续运动,一次性下压  $L_2$  的距离。下

压距离  $L_2$  应有固定合适的大小,若  $L_2$  过大,则会导致焊点被压成扁平状;若  $L_2$  过小,则焊锡片上下部分受热不均匀,出现半熔融状态。经过多次实验,确定  $L_2$  大小为  $140$  个脉冲,即  $140\text{ }\mu\text{m}$ 。

对于检测烙铁头与焊锡片是否接触,一般采用视觉检测或力觉检测的方法。由于悬丝与焊锡片尺寸微小,首先采用力觉检测接触的方法,即烙铁头在步进运动  $L_1$  过程中,力传感器实时检测焊接模块的压力变化,以此作为烙铁头与焊锡片接触的依据。采用该方法的焊接结果如图 13(a)所示,从图中可知存在焊点扁平、悬丝脱焊的现象,这是由于焊接头与焊锡片接触后,由于存在较快的热传导,焊锡片迅速熔化并且脱离与烙铁头的接触,导致力传感器无法及时地采集到压力变化,出现烙铁头下压过头的现象。在烙铁头与焊锡片接触传热的瞬间,通过人机交互界面可观察到烙铁头温度有较为明显的下降。因此,考虑采用温度检测接触的方法,即烙铁头在步进运动  $L_1$  过程中,通过温度传感器检测烙铁头与焊锡片接触时的温度变化。焊接结果如图 13(b)所



(a) 力觉检测接触  
(a) Force detection of contact

(b) 温度检测接触  
(b) Temperature detection contact

(c) RZ旋转后焊接  
(c) Welded after RZ rotation

图 13 焊接优化对比实验结果

Fig. 13 Welding optimization compares experimental results

示,从图中可知该方法焊接得到的焊点光滑、悬丝无脱焊,但此时仍存在焊点向右流淌、影响悬丝工作段的现象(图 13(b)红色线框所示)。具体分析原因,调节轴侧焊接立柱存在干涉壁面,使焊接头不能在焊锡片正上方的焊接位置进行焊接动作(黄色线框所示),焊锡的受热位置偏向一侧,故导致焊点向右侧流淌。因此,采用工作台

模块的绕 Z 方向的精密转台,在进行左侧下压焊接之前,将底座绕 Z 方向逆时针(俯视)旋转,使焊接头能够在居中对称的位置进行焊接,焊接结果如图 13(c)所示。与参考文献[5-6]中用机械臂和焊锡机器人焊接出焊点结果对比图如图 14 所示,由图可知,本设备的焊点质量更加圆润、光滑(彩图见期刊电子版)。

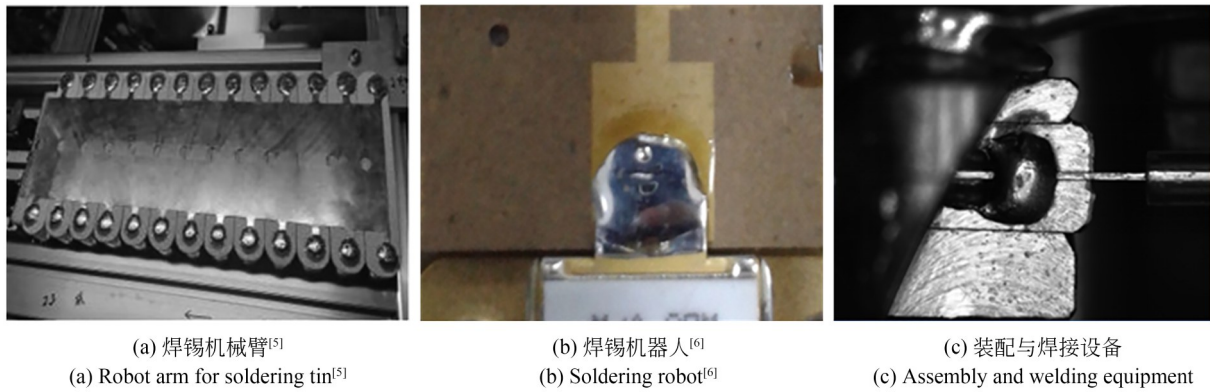


Fig. 14 自动锡焊设备焊接实验结果对比

Fig. 14 Comparison of welding experiment results of automatic tin welding equipment

经过多组仿真与实验优化,最终制定了如图 15 所示的自动化焊接策略。对十组加速度计底座组件进行了装配与焊接实验。

装配与焊接完成后,由设备自身的视觉测量模块,对底座与摆组件的装配间隙进行检测,相机的空间分辨率为 1.745  $\mu\text{m}$ ,满足测量精度要求。检测结果如表 3 所示。由于该设备先进行左侧焊接再进行右侧焊接,而右侧焊接面在图像中的 Y 方向坐标往往较左侧大,因此左侧 D2 偏差一般为负值,右侧 D2 偏差一般为正值。由实验数据可知,该自动化装配系统可满足加速度计底座组件的装配技术指标要求。

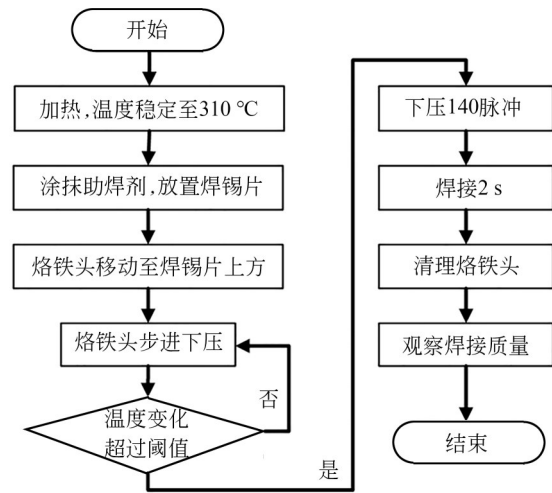


图 15 自动化焊接流程图

Fig. 15 Flowchart of automated welding

表 3 装配技术指标检测结果

Tab. 3 Results of assembly specification test

技术指标	组件 1	组件 2	组件 3	组件 4	组件 5	组件 6	组件 7	组件 8	组件 9	组件 10
间隙值 D1 偏差/ $\mu\text{m}$	-26.0	-23.9	-23.9	-26.0	-25.2	-22.1	-4.7	-4.7	-22.8	19.8
左间隙值 D2 偏差/ $\mu\text{m}$	-19.1	0.8	-19.5	-12.4	0.2	-19.5	-18.6	-6.6	-17	-16.2
右间隙值 D2 偏差/ $\mu\text{m}$	19.5	13.6	17.5	15.4	16.7	13.2	18.2	10.8	13.6	10.8
悬丝力误差/gF	0.4	-0.4	0.1	0.3	-0.2	0.4	-0.2	0.3	0.1	-0.2

## 5 结 论

针对加速度计底座组件人工装配难点,研制出一台精密自动化装配与焊接设备,开发专用焊接结构并制定焊接策略。该设备可实现跨尺度复杂形状微小零件的精密装配,完成微细悬丝精准穿孔和摆组件与底座的间隙调整,以及悬丝与底座焊接立柱的高质量自动化焊接,在焊接过程中悬丝张紧力误差控制在 $\pm 0.5$  gF。

### 参考文献:

- [1] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 2-28.  
LIU J H, SUN Q C, CHENG H, *et al.* The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54 (11) : 2-28. (in Chinese)
- [2] 路永乐. 小型悬丝摆式加速度传感器原理及关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LU Y L. *Study on the Principle and Key Technology of Small Suspension Wire Pendulum Acceleration Sensor* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [3] GIOUROUDI I, HÖTZENDORFER H, KOSEL J, *et al.* Development of a microgripping system for handling of microcomponents [J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(2): 148-152.
- [4] 童辉. 超细桥丝全自动焊系统自动送丝控制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.  
TONG H. *Research on Automatic Wire Feeding Control Technology of Ultra-Fine Bridge Wire Automatic Welding System* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [5] 何泽钧, 孙檀, 徐刚, 等. 金属化薄膜电容器扁形元件自动锡焊系统[J]. 机械制造, 2021, 59(10): 56-58.  
HE Z J, SUN T, XU G, *et al.* Automatic soldering system for flat components of metallized film capacitor[J]. *Machinery*, 2021, 59(10): 56-58. (in Chinese)
- [6] 苏赞. 基于机器人的自动锡焊控制技术研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2016.  
SU Z. *Research on Automatic Soldering Control Based on Robot* [D]. Beijing: General Research Institute of Mechanical Sciences, 2016. (in Chinese)
- [7] YAN Z. Discussion on the welding performance of automatic welding of industrial robot and manual welding [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 637(1): 012004.
- [8] MURYGIN A V, TYNCHENKO V S, LAPTE-NOK V D, *et al.* Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 173: 012023.
- [9] REN H, WU X Y, SHANG W F. Vision-based soldering process parameters calculation for robotic soldering [C]. 2021 *IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. 15-19, 2021, Xining, China. IEEE, 2021: 1189-1194.
- [10] 崔奇, 张均红, 刘德林. 加速度计悬丝断裂分析 [J]. 失效分析与预防, 2010, 5(1): 52-55.  
CUI Q, ZHANG J H, LIU D L. Fracture analysis of suspension wire in accelerometer [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2010, 5(1): 52-55. (in Chinese)
- [11] 任同群, 钱志龙, 徐龙, 等. 悬丝摆式加速度计摆组件自动装配系统[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1609-1619.  
REN T Q, QIAN Z L, XU L, *et al.* Automatic assembly system for pendulum components of wire suspended pendulum accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(7): 1609-1619. (in Chinese)
- [12] LUO Y, CHEN M Y, WANG X D, *et al.* Precision assembly system based on position-orientation

- decoupling design [C]. 2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). 22-24, 2019, Shanghai, China. IEEE, 2020: 685-688.
- [13] 张培玉, 武国英, 郝一龙, 等. 微夹钳研究的进展与展望 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 292-296.  
ZHANG P Y, WU G Y, HAO Y L, et al. Development of microgripper technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3)292-296(in Chinese)
- [14] 蔡钧达, 江慧萍. 锡焊质量与焊接温度的研究 [J]. 电子工艺技术, 1982,(1): 27-34.  
CAI J D, JIANG H P. Study of solder quality and soldering temperature [J]. *Electronic Process Technology*, 1982,(1): 27-34. (in Chinese)
- [15] 张焕良. 锡焊机器人加热技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
ZHANG H L. *Research on Heating Technology of Soldering Robot* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 余柏南. 一种锡焊机匀速送丝电路的设计 [J]. 电子科技, 2010, 23(8): 87-89.  
YU B N. Design of wire feed circuit with uniform speed for a soldering machine [J]. *Electronic Science and Technology*, 2010, 23(8): 87-89. (in Chinese)

#### 作者简介:



任同群(1980—),男,辽宁省瓦房店人,博士,副教授,2002年、2005年、2008年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为大连理工大学机械工程学院微纳米技术及系统研究所副所长,主要从事精密微小装配技术、精密测试技术及信号处理等方面的研究。E-mail: ren\_tq@dlut.edu.cn

#### 通讯作者:



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,1987年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现任精密与特种加工教育部重点实验室(B类)副主任,主要从事精密微小装配技术、精密测试技术、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn